

3. eranskina. Erradioaktibitateak osasunean duen eragina

Chernobylgo istripuan askatutako erradioaktibitateak ingurumenean eta izaki bizidunengan izan zuen eragina. Erradioaktibitateak sortu ditzakeen osasun kalteen inguruan gehiago ikas-teko xedearekin, lehenik, erradioaktibitatea neurtzeko erabiltzen diren unitateak definituko ditugu, eta ondoren, erradioaktibitateak eragiten dituen osasun kalteak aztertuko ditugu.

Erradiazioaren kaltea neurtzeko kantitateak eta unitateak

Erradioaktibitatea aztertzeko garrantzitsua da fisika nuklearrean erabiltzen diren magnitude fisikoak eta beraien unitateak zeintzuk diren aztertzea.

Lehenik, erradiazioak ingurumenarekin duen elkarrekintza neurtzen duen kantitate bat definituko dugu, LET (“Linear energy transfer”) kantitatea. LET kantitateak erradiazioak ingurumenari luzera unitateko igortzen dion energia kantitatearen batz bestekoa adierazten du. Honela definitzen da LET kantitatea [1]:

$$\frac{dE_L}{dl} \tag{0.0.1}$$

LET magnitudea keV/ μ m unitateetan adierazten da normalean. LET kantitatea oso garrantzitsua da erradiazioak zeluletan eragiten duen kaltea ulertzeko [1].

Orain, azter dezagun erradioaktibitatea neurtzen duen kantitate bat: aktibitatea. Aktibitateak lakin nuklear batek denbora unitateko jasaten duen desintegrazio kopurua neurtzen du. Bi unitate ezberdinetan adierazi ohi da. Nazio Arteko Unitate Sistemari, aktibitatea Bequerel (Bq) unitateetan neurtzen da, eta bequerel batek segundoko desintegrazio bakarra adierazten du. Historikoki Curie (Ci) unitatea erabili izan da aktibitatearen unitate bezala, eta $1\text{Ci}=3.7 \cdot 10^{10}\text{Bq}$ dira [1].

Defini dezagun gorputzak jasotako erradiazio kopurua neurtzen duen magnitude fisiko bat, xurgatutako dosia. Erradiazioak organo edo ehun jakin bat zeharkatzen duenean, materiala osatzen duten atomoek energia kantitate bat xurgatzen dute. Materialak masa unitateko xurgatutako energia kantitatea da xurgatutako dosia. Xurgatutako dosi kantitatearen arabera finkatzen baditugu erradiazioaren unitateak, ”rad”unitatea eta SI sistemari erabiltzen den ”Gray”unitatea ditugu [2].

$$1\text{rad} = 10^{-2}\text{J/kg} ; 1\text{Gy} = 1\text{J/kg} ; 1\text{rad} = 100\text{Gy}$$

Orain arte, erradiazioarekin lotutako magnitude fisikoak definitu ditugu. Gure xedea erradiazioak eragiten duen kalte biologikoa aztertzea denez gero, defini ditzagun zeintzuk diren erradiazioaren kalte biologikoa neurtzeko baliagarriak diren kantitateak.

Gorputzak masa unitateko xurgatu duen energia kantitatea definitu dugu, dosia. Dosiak erradiazioak gorputzean sortutako kaltearen inguruko informazioa helarazten digu. Hala eta guztiz ere, erradiazioak eragiten duen kaltea ez da xurgatutako dosiaren arabera soilik, baizik eta erradiazio motaren (bere LET) eta energiaren arabera ere bada. Erradiazio mota eta energia haztatze-faktorea deritzon, ω_R , magnitudearen bidez neurtzen da, eta erradiazioaren eraginkortasuna adierazten du [2]. Erradiazioaren haztatze-faktorea adimentsionala da eta honako balioak hartzen ditu [3]:

Erradiazioa	ω_R
X-izpiak energia guztietan	1
Elektroiak eta muoiak energia guztietan	1
Protoiak eta kargatutako pioiak	2
α partikulak, fisio zatiak eta nukleo astunak	20
Neutroiak	$2.5 + 18.2e^{-\frac{(\ln E_n)^2}{6}}$ $E_n < 1MeV$
	$5 + 12e^{-\frac{(\ln(2E_n))^2}{6}}$ $1MeV \leq E_n \leq 50MeV$
	$2.5 + 3.25e^{-\frac{(\ln(0.04E_n))^2}{6}}$ $E_n > 50MeV$

1. taula. Haztatze-faktoreen balioak [3]-ren arabera

Orduan, erradiazioak eragiten duen kalte biologikoa, organo edo ehunetan eragiten duen kaltea alegia, xurgatutako dosiaren eta haztatze faktorearen arabera da. Kantitate horri dosi baliokidea esaten zaio. R motako erradiazioaren ondorioz T motako organoak era eraginkorrean xurgatuko duen dosi kantitatea neurtzen du eta eta honela definitzen da [1, 2]:

$$H_T = \omega_R D_{R,T} \quad (0.0.2)$$

H_T , ω_R eta $D_{R,T}$ dosi baliokidea, haztatze faktorea eta R erradiazioagatik T organo edo ehunak xurgatutako dosia dira hurrenez hurren. Bi unitate erabiltzen dira dosi baliokidea adierazteko: rem eta Sievert (SI unitatea da).

$$1 \text{ rem} = \text{dosia rad unitateetan}$$

$$1 \text{ Sv} = \text{dosia Gy unitateetan}$$

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$$

Erradiazioak eragiten duen kaltea erradiatutako organo edo ehunaren arabera ere bada. Erradiazioak gorputz osoan era uniformean eragingo balu, organo edota ehun batek gorputzean eragiten duen kaltea hartu behar da kontutan erradiazioak eragiten duen kaltea neurtzeko. Kantitate hori ehunaren haztatze-faktorea deitzen da, ω_T . Honakoa da haztatze-faktorea ehun edo organoaren arabera [2]:

Ehun edo organoa	ω_T
Gonadak	0.20
Hezur-muina, Kolona, birikak, urdaila	0.12
Maskuria, bularra, gibela, hestegorria, tiroidea	0.05
Azala, hezur-azala	0.01

2. taula. Haztatze-faktoreen balioak [1].

Haztatze-faktorea kontutan hartzen duen beste magnitude bat da dosi eraginkorra, eta haztatze faktorearen eta dosi baliokidearen arteko biderketa da. Horrenbestez, dosi eraginkorra edo dosia erradiazioaren edozein konbinaziok gorputzaren edozein organo zein ehunetan eragiten duen kaltearen neurketa da. Honela definitzen da [2]:

$$E = \omega_T \omega_R D_{R,T} \quad (0.0.3)$$

Azpimarratu beharra dago definitu ditugun magnitudeak norbanakoaren kasurako baka-rrik direla baliagarriak.

Erradioaktibitatearen eragin biologikoak pertsonengan

Erradiazio ionizatzaileak gorputzeko ehun eta organoak zeharkatzen dituenean, ehun eta organoetako zelulak osatzen dituzten molekulak ionizatu ahal ditu. Ionizazio prozesuek atomo eta molekulak aldatzen dituzte, eta ionizatzen den molekulari erradikala esaten zaio. Ionizazio prozesua gertatzen denean, normalean, geratzen den elektroio askeak eta erradikal askeak birkonbinatu egiten dira. Batzuetan ordea, erradikal askeak ez dira birkonbinatzen eta beste molekulekin elkarrekintza sortzen dute. Ondorioz, elkarrekintzagatik, zelulen material genetikoa kaltetu edota desaktibatu dezakete. Zelula baten dagoen DNA desaktibatzen bada, zelula horrek bere funtzioa betetzeko gaitasuna galtzen du. Gainera, zelularen material genetikoa, DNA, kaltetzen bada, zelula horrek bere eginkizunak aldatzen ditu gorputzaren kalterako. Aitzitik, gorputza gai da zelula kaltetuak konpontzeko, eta beraz, xurgatutako erradiazioak ez du beti gorputza kaltetzen. Hala ere, zenbat eta handiagoa izan jasotako dosia eta denboran gertatzen den dosiaren sakabanaketa gorputzean, orduan eta zailagoa da kaltetutako zelulak konpontzea. Dosia denbora pasata gorputzean zehar sakabanatzen bada eta ezin badira konpondu, zelula kaltetuen hilketa eta zelulen zatiketa zelularra gertatzen da. Gerta daiteke zelulen hilketa ez gertatzea eta zelula horien mutazioa gertatzea. Zelularen mutazioa gertatzen denean, beste kalte batzuk eragiten ditu gorputzean [2].

Erradiazioak gorputzean eragiten dituen kalteak bi multzotan sailka daitezke: eragin deterministak eta eragin estokastikoak. Hiru propietatek bereizten dituzte bi multzoak [1]

- **Eragin deterministak**

Eragin deterministak gorputzak erradiazioa xurgatu eta gutxira nabarmentzen diren eraginak dira. Ehun eta organoetan atariko dosi batetik gora gertatzen dira kalteak, eta behin atariko dosia gaindituta, zenbat eta handiagoa izan xurgatutako dosia, hainbat eta handiagoa da erradiazioak sortutako kaltea [1, 2].

Erradiazioak ez du modu berean eragiten gorputzeko organo guztietan, organo batzuk besteak baino erradiosentikorragoak dira. Erradiosentikortasuna Bergoine eta Tribondeauren legearen bidez definitzen da: “Zelula baten erradiosentikortasuna bere banaketaren abiadurarekiko proportzionala eta zelularen espezializazio mailarekiko alderantziz proportzionala da”. Hau da, espezializatu gabekoa den eta banaketa abiadura handia duen zelula da erradiosentikorrena. Adibidez, hezur-muinean zelula oso espezializatuak daude, hala nola linfozitoak, leukezitoak, plaketak eta globulu gorriak. Gainera, zelula horietako askok ez dute banaketa zelularrik izaten. Ondorioz, erradioerresistikorrak dira. Hala ere, hezur-muinak erradiazio dosi kantitate handia jasanez gero (atari-dosia 3 Gy-koa da [4]), osasun kalte handiak sor daitezke gorputzean, gorputzaren funtzionamendua bermatzen duten zelula espezializatuak kaltetzen baitira [1].

Eragin deterministaren ondorioz larriena heriotza da. Gizabanakoa hil egingo da 3.5-4.5 Gy-ko dosi uniforme jasan badu eta ez badu osasun laguntzarik jasan [1]. Osasun laguntza jasan badu 5 Gy-ko dosi uniforme edo dosi handiagoak eragin dezake heriotza pertsona batean [2]. Gorputzak erradiazioaren dosi handia xurgatu badu, gorputzean aldaketak eragingo dizkion gaixotasuna jasango du, erradiazio akutuaren sindromea. Erradiazio akutuaren sindromearen azken ondorioa heriotza izaten da normalean. Baina, gizabanakoaren heriotza gertatu baino lehen, gorputzean zenbait kalte gertatzen dira. Gizabanakoak, lehenik, goragalea, beherakoa, okadak eta apetitu falta izango ditu. Ondoren, osatu egin dela sumatuko du, energia handiagoa izango baitu. Hala ere, aste batzuk pasata erradiazioaren ondorioz eragingo gaixotasunak izango ditu. Gaixotasun horiek pasata giza banakoa osatu ala bizi daiteke. Gizabanakoaren heriotza erradiazioa xurgatu eta hilabete gutxitara gertatuko da [1]

Heriotzaz gain, beste zenbait osasun arazo eragin ditzake erradiazioak. Adibidez, erradiazioak gorputz azalean eragiten badu, dosi kantitatearen arabera gaixotasun ezberdinak eragingo ditu. Kalteak eragingo dituen atari-dosia 3Gy-koa da, non dosi kantitate hori baino gehiago xurgatuta gizabanakoak azaleko ilea galduko duen. Kalte handienak 50 Gy baino handiagoa den dosia xurgatuta gertatuko dira, eta gizabanakoak erradio- nekrosia eta azaleko ultzerak izango ditu.

Bestalde, gonadei dagokienez, erradiazioak gonadetan (ernalketa-zelulak sortzen dituzten organoak) antzutasuna eragin dezake, eta gizabanakoa antzua bihurtzeko probabilitatea dosi kantitatearen eta gizabanakoaren sexuaren arabera da. Emakumeetan, atari-dosia adinaren arabera da, 40 urtetik gorako emakumeek 1.5 Gyko dosia xurgatuta antzutasuna izan dezakete. 2.5-5.0 Gy-ko dosia xurgatuta ordea, 40 urtetik gorako emakumeak antzu bihurtuko dira, eta 15-40 urtekoak antzu bihurtzeko % 60ko probabilitatea izango dute. Gizonek 0.1-0.3 Gyko atari-dosia xurgatuta pairatuko dituzte erradiazioaren ondorioak, non periodo batean antzutasuna izango duten [1].

Erradiazioaren eragin deterministaren beste adibide bat dira kataratak. Ziklotroietan lan egiten duten fisikariegan, X-izpiekin sendatutako gaixoengan, eta bomba nuklearren erasotik bizirik ateratako pertsonengan atzeman zen lehen aldiz. Begiek γ edota β erradiazioaren 2 Gy inguruko atari-dosia baino dosi handiagoa xurgatuta, gizabanakoak kataratak izan ditzake. Neutroien kasuan, berriz, atari-dosia txikiagoa da: 0.15-0.45 Gy [1]

- **Eragin estokastikoak**

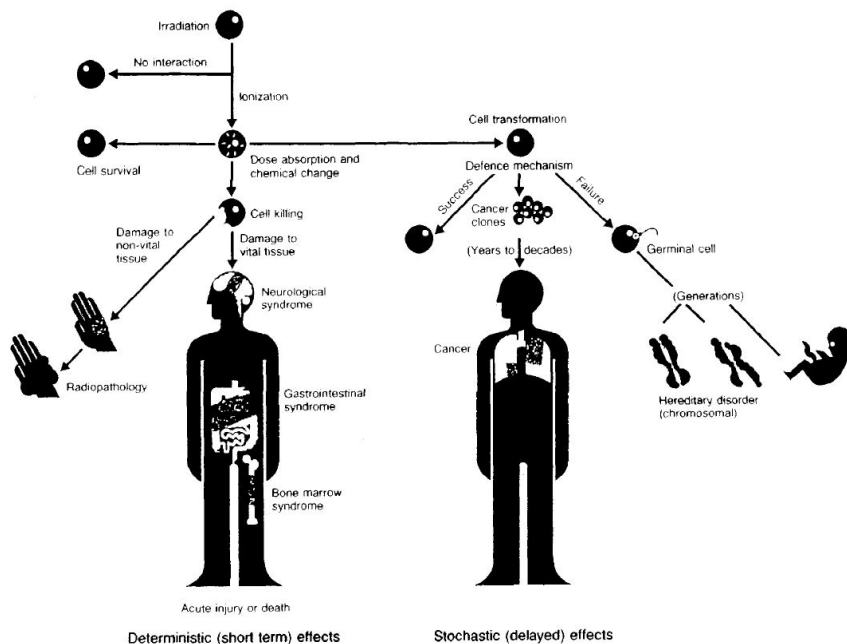
Erradiazioaren ondorioz kaltetutako zelula hil beharrean, zelularen mutazioa gertatzen bada eragin estokastikoak gertatzen dira. Eragin estokastikoak irradiazioaren eraginpean egon eta denbora luzea igarota agertzen diren eraginak dira. Erradiazioaren eragina pairatzen den unetik, haren ondorioak nabaritzen diren unera arte pasatako denborari latentzia periodoa esaten zaio. Beraz, eragin estokastikoak latentzia periodo luzeko eraginak dira, eta eragin estokastikoen adibide dira kantzerra eta mutazio genetikoak [2].

Zenbat eta jasotako dosia handiagoa izan, are eta handiagoa da kantzerra izateko probabilitatea; baina, kantzerraren larritasuna ez da jasotako dosi kantitatearen arabera. Berebat, populazio heterogeneoa aztertuz gero, ikusi da 1 Sv-ko dosia jasan duen populazioaren %5-ak duela erradiazioaren ondorioz kantzerra izateko probabilitatea [2].

Bestalde, erradiazioak ernalketa-zeluletan (ondorengo belaunaldi helarazteko informazio genetiko dituzten zelulak) eragiten badu, ondoretasunezko gaixotasunak eragin ahal dizkio belaunaldi berriari. Erradiazioak ernalketa-zeluletan eragiten duenean, ADNak duen kode genetikoaren apurketa edota orden aldaketa eragin dezake, eta ondorioz, jaiotako umeak ondoretasunezko gaixotasunak izan ditzake, hala nola Down sindromea edota adimen-urritasuna. [2].

Eragin estokastikoak murriztu ahal izateko populazioan dosi-baliokidearen mugak jarri dira. Horretarako, populazioa bi multzotan banatu da: erradiazioaren menpe lan egiten duten langileak, eta beste guztiak. Erradiazioaren eraginpean lan egiten duten langileek ezin dute urteko 20 mSV baino dosi baliokidea baino dosi handiagoa xurgatu. Bestale, orohar, populazioak ezin du 1 mSv baino dosi handiagoa xurgatu. Hala ere, egoera berezia bada, dosi baliokidearen muga handitu daiteke, beti ere, bost urtetan ez bada bataz bestean 1 mSV/urte dosia gainditzen. Muga orokorrak gorputzeko atal batzuentzat ere daude definiturik. Kristalinoaren kasuan, erradiazioaren eraginpean lan egiten duen pertsonak ezin du 150 mSV/urte baino dosi eraginkor handiagoa xurgatu, eta orokorrean, ezin da 15 mSV/urte dosi eraginkorra gainditu. Azalaren kasuan, langileak ezin du 500 mSV/urte muga gainditu, eta orokorrean, ezin da 50 mS/urte dosi eraginkorra gainditu [3, 4]

Ondorengo irudian, erradiazioak gorputzean izan dezakeen eraginaren eskema ikus daiteke. Bertan, argi ikus daitezke zeintzuk diren eragin estokastikoak eta zeintzuk deterministak:



1. irudia. Erradiazioaren eragina gorputzean azaltzen duen eskema. (Iturria [2]).

Orain arte, erradiazioak epe laburrean edota epe luzean gorputzean eragin ditzakeen kalteak aztertu ditugu. Baina, ez dugu aipatu erradiazioak kalte hori egiteko jarraitutako bidea. Izan ere, ez da gauza bera erradiazioa gorputzetik kanpo gertatzea, kanpo erradiazioa, edo erradiazioa gorputzean barneratutako erradionukleidoen ondorioz gertatzea, barne erradiazioa. Beraz, azter ditzagun kanpo erradiazioaren eta barne erradiazioaren bideak, eta

gorputzean kaltea eragiten duten erradionukleidorik garrantzitsuenak (beti ere, Chernobylgo istripuan askatutako erradionukleidoak kontuan izanda) .

- **Kanpo erradiazioa**

Hodei erradioaktiboak gizakiongan zuzenean eragin ditzakeen kalteak aztertuko ditugu. Hori horrela, azter dezagun nola eragiten duten α , β eta γ erradiazioek gorputzean:

- **α erradiazioa:** α partikulak helmen txikiko eta LET handiko partikulak dira. Airean dauden erradionukleidoak desintegratzean, zentimetro gutxi batzuk igarotzen dituzte. Berebat, nahiz eta partikulak azalarekin kontaktuan egon, horiek ez dituzte azal geruzak zeharkatzen. Horrenbestez, α partikulak ez dira gizakiontzak arriskutsuak kanpo erradiazioaren eraginpean[2].
- **β erradiazioa:** β partikulek airean, α partikulek baino bide luzeagoa egiten dute. β partikulek gorputzaren gainazaleko ehun eta organoetan kalteak eragiten dituzte, eta pertsonak jasotako dosia puntu batean dagoen β erradiazioaren iturriaren kontzentrazioaren arabera da [2].
- **γ erradiazioa:** γ erradiazioa gizakiontzat arriskutsuena den erradiazio mota da, eta LET txikiko partikulak dira. Izan ere, fotoiek airean ehundaka metro bidaiatu ditzakete, eta materialak zeharkatzeko gaitasun handiagoa dute. Horrenbestez, gorputz guztiko ehunak zeharkatu ahal dituzte eta ehun eta organoetan kalteak eragin. Pertsona batek jasotako dosia γ erradiazioa sortzen den iturriaren kontzentrazioaren arabera da [2].

Aipatzekoa da Chernobylgo istripua gertatu zenean, Chernobylgo zentral nuklearraren inguruan bizi ziren pertsonak ez zituztela bi egun pasa arte ebakuatu. Ondorioz, Chernobyl inguruko jendeak kontaktu zuzena izan zuen pasatako erradiazio hodeiarekin, eta erradionukleidoak haien azalean eta arropetan izan zituzten. Hori horrela, populazioak β erradiazioaren eraginak pairatu zituen gorputz azalean, eta γ erradiazioarenak gorputz guztian zehar. α partikulak ere izan zituzten, baina aipatu bezala, α partikulek ez dute osasunean eragin larririk sortzen kanpo erradiazioaren eraginpean [2].

Horrez gain, hodei erradioaktiboa pasatzean bai euriaren eraginez, bai aireagatik, lurrazalera erradionukleidoak isuri daitezke. Lurrazaleko erradionukleidoak lurraren eta erradionukleidoen egoera kimikoaren arabera disolbatzen dira lurtean. Adibidez, pH 4ko lurretan, erradionukleidoen erdia disolbatzeko urtebete behar da, baina, pH 7ko lurretan 14 urte inguru behar dira erradionukleidoen erdia disolbatzeko. Lurrak disolbatzen ez dituen erradionukleidoak airearen eraginez mugitu egiten dira eta, zuzenean eragiten dute giza gorputzean. Horrez gain, lurrak xurgatutako erradionukleido kopuru bat lurtean dauden landareek xurgatu eta berriro isuri daitezke atmosferara, eta inguruan dauden gizakiengan eragina izan [5].

Hala ere, kanpo erradiazioa ez da gizakiongan osasun kalteak eragiten dituen bide bakarra. Izan ere, ingurumenak xurgatutako erradionukleido batzuk animaliek eta landareek xurgatzen dituzte, eta horiek jatearen ondorioz, gizakiok erradionukleidoak barneratu ditzakegu gorputzera. Hau da, kate trofikoaren bidez, erradionukleidoak barneratzen ditugu. Gainera, airean dauden erradionukleidoak arnasketaren bidez barneratu ditzakegu gorputzean. Bide horiek barne erradiazioaren bideak dira.

- **Barne erradiazioa**

Barne erradiazioa arnasketa-aparatuaren eta digestio-aparatuaren bidez, gorputzera barneratzen ditugun erradionukleidoen ondorioz gertatzen da. Gorputzak barneratutako materia erradionukleidoen desintegrazioen modu berean deskribatu daiteke. Hau da, lehen ordenako ekuazio diferentzialak deskribatzen du gorputzak xurgatutako materia gorputzetik nola ezabatzen den. Hortaz, erdibizitza biologikoa defini dezakegu, gorputzean materialak erdira murrizteko behar duen denbora. Orduan, barne erradiazioa aztertzeke kontuan izan behar ditugu, batetik erradionukleidoaren erdibizitza, τ_r , eta bestetik, erdibizitza biologikoa, τ_b . Hori horrela, biak erlazionatzen dituen erdibizitza definitzen da: erdibizitza eraginkorra. Erdibizitza eraginkorra honako erlazioak definitzen du [1]:

$$\tau_e = \frac{\tau_r \cdot \tau_b}{\tau_r + \tau_b} \quad (0.0.4)$$

Horrenbestez, barne erradiazioa aztertzerako orduan eta dosi kantitateak kalkulatzera-ko orduan, erradionukleidoaren erdibizitza eraginkorra izaten da kontuan [1].

Ekin diezaiogun barne erradiazioaren bideak eta eragina aztertzeari. Aipatu bezala, arnasketa-aparatuaren bidez, erradionukleidoak barneratu ditzakegu gorputzera. Arnasten den erradionukleido kopurua pertsonaren adinaren eta tamainaren arabera da. Halaber, ariketa fisikoa egiten dagoen pertsonak xurgatuko duen erradionukleido kopurua, geldo dagoen pertsonak xurgatzen duena baino handiagoa izango da [2].

Arnasketaren ondorioz barneratutako erradionukleidorik arriskutsuena ^{239}Pu da. Chernobylgo istripuaren ondorioz, isotopo horren 0.013 PBq askatu ziren ingurunera eta ^{239}Pu -ren erdibizitza 24000 urtekoa da [5]. Gorputzaren barnean dagoenean, α partikulak igortzen ditu, eta beraien helmenean hezurretan eta ehunetan 24 μm -koa eta 40 μm -koa da hurrenez hurren. α partikulek kalte handiak sortzen dituzte gizakiongan, izan ere, LET handiko partikulak dira eta barne erradiazioaren eraginpean, helmen txikia dutenez, gorputzeko molekulekin gertatzen den energia transferentzia handia da [1]. Plutonio isotopoa, batez ere, birikietan eta gongoil linfatikoetan pilatzen da, eta haren erdibizitza eraginkorra 150-1000 eguneko da organo horietan. Birikek 8 Gy-ko atari-dosia xurgatzen badute, gizabanakoak neumonia izan dezake. Gongoil linfatikoei dagokienez, erradiazioak sistema immunean eragin, eta 0.1 Gy-ko atari-dosia gaindituta babes kalteak izan ditzake gizabanakoak [6]. Plutonio isotopoaren pilaketa haren disolbagarritasunaren eta tamainaren arabera da, izan ere, plutonio isotopoa disolbagarria bada arnastutako plutonioaren %45a eskeletora isurtzen da, beste %45a gibelerara, eta %10a gorputzeko beste ehun batzuetara. Eskeletoan 400 urteko erdibizitza eraginkorra du eta gibelean 40 urtekoa [2]. Plutonio disolbagarriak hezurretan eragiten du kalte handiena, hezur-muinak 3-5 Gy-ko atari-dosia gainditzen badu, 4-8 aste pasata gizabanakoa hiltzeko %50ko probabilitatea dago [4, 6]. Gibelean, ordea, digestio-aparatu osoan bezala, 2 Gy-ko atari-dosia gaindituta eragiten dira kalteak, hala ere, atari-dosi hori gaindituta sortzen diren kalteak ez dira hezur-muinean gertatzen diren bezain larriak [6].

Barne erradiazioaren beste bide bat jatearen edo edatearen bidez erradionukleidoak gorputzera barneratzea da. Bide honek epe luzeko kalte eragiten du. Erradionukleidoak solo eta ortuetara isurtzen direnean, horiek lurrazalean eta landareen hostoetan

geratzen dira. Landareek beraien hostoetan geratzen den erradionukleidoen zati bat xurgatzen dute, eta ondorioz, erradionukleidoak landarean zehar hedatzen dira. Prozesu horri translokazioa deritzo. Translokazioa ez da erradionukleido guztiekin gertatzen. Adibidez, landareek zesioa xurgatzen dute, baina, plutonioa ez [2]. Honakoa dugu landareek zesioa xurgatzearen arrazoa. Potasioa landareen hazkuntzarako ezinbestekoa den oinarritzko elementua da, eta landareek potasioa garraiatzeko potasio katioiaren kanalak dituzte. Zesioa eta potasioa talde bereko elementu kimikoak direnez gero, antzeko portaera biokimikoak dituzte, eta ondorioz, zesioak potasio katioiaren kanalak erabiltzen ditu landarean zehar hedatzeko [7]. Bestalde, lurra xurgatzen dituen erradionukleidoen zati bat landareen sustraiek xurgatu ditzakete eta, ondorioz, landarean zehar erradionukleidoa hedatu daiteke. Gizakiok landare horiek jatean, erradionukleidoak barneratzen ditugu, eta gure gorputzean eragiten dute.

Landareak jaten ditugunean erradionukleidoak barneratzen ditugu, hala ere, hori ez da bide bakarra erradionukleidoak barneratzeko, animalien produktuen bidez erradionukleidoak barneratu ahal ditugu eta. Animalien produktuen bidez barneratutako erradionukleidoen bide ikertuena behien esnearen bidea da. Behiek soloaren zati handi batean larratzen dute, eta soloa kutsatuta badago, soloko erradionukleidoen zati garrantzitsu bat barneratu eta bere haragi eta esnea kutsatzen dira. Hala ere, elikagaiak sukaldatzen ditugunean edota prozesatzen ditugunean, dituzten erradionukleidoen zati bat garbitzen da, bai elikagaiak garbitzen direlako, baita elikagaiak prozesatzen direnean beraien goiko geruzak kendu egiten direlako eta elikagaiak duen erradionukleidoen kopurua murrizten delako [5, 2].

Barne erradiazioagatik kalte handiena eragiten duten isotopoak ^{137}Cs , ^{90}Sr eta ^{131}I dira. Zesio isotopoak γ eta β desintegrazioak, eta estrontzio eta iodo isotopoek β desintegrazioak jasaten dituzte. Hau da, LET txikiko (γ partikulak) edo ertaineko (β partikulak) erradiazioa izaten da gorputz barnean. Hori horrela, gorputz barneko zelulekin gertatzen den energia transferentzia txikiagoa da, eta gizabanakoak dosi altuagoak xurgatu behar ditu erradiazioak osasun kalteak eragin ditzan. Hala ere, LET txikiko partikulak direnez gero, helmen handiagoa dute, eta gorputz osoan sakabanatzeko arrisku handiagoa dute.

Zesio isotopoa bai arnasketaren bidez, bai landareen eta animalien produktuak janda, barneratu dezakegu. Zesio isotopoa gorputzean barneratzeko biderik arruntena landareak jatearen ondoriozkoa da. Landareak jatearen ondorioz barneratu ahal ditugun erradionukleidoen artean, biologikoki kalte handiena eragiten duten isotopoa da eta 30 urteko erdibizitza du. Esan bezala zesioak eta potasioak portaera biokimiko antzekoa dute, eta ondorioz, zesioa gorputzera sartzean potasioaren modu berean hedatzen da eta metabolizatzen da. Zesio isotopoa gorputzaren fluidoetan disolbatzen da eta, giltzurrunek 70-110 egun igarota botatzen dute gorputzetik (iraitz aparatuen bidez botatzen da), hala ere, umek 12-57 egunean kanporatzen dute. Digestio aparatuan 2 Gy-ko atari-dosia gaindituta eragin ditzake kalteak gorputzean, eta giltzurrunek 30 Gy-ko atari-dosia gainditzan badute, 2-3 urtez gizabanakoak giltzurruneko gaixotasunak izan ditzake [4]. Zesio isotopoak ere, haurdun dauden emakumeengan eragiten du. Zesioa zazpi egun inguruz emakumearen fetuan bildu daiteke eta fetuari kalteak eragin [2].

Halaber, ^{90}Sr isotopoa dela arnasketagatik, dela janariaren bidez, gorputzera barneratzean, estrontzio isotopoa gorputzaren fluidoetan eta hezurretan biltzen da, erdibizitza

eraginkorra 15 urtekoa delarik. Hezurretan biltzen da kaltzioaren talde kimiko berean egonik, kaltzioaren portaera biokimiko berdin-antzekoa duelako. Hezurretan biltzean, β desintegrazioak jasaten ditu eta hezurra bera eta hezur-muina kaltetzen ditu. Esan bezala hezur-muinean eragiten badu, 3-5 Gy-ko atari-dosia gaindituta, 4-8 aste pasata gizabanakoa hitzeko %50ko probabilitatea dago. Gainera, estrontzio isotopoak haurdun dagoen emakumearen fetuan eragin dezake, izan ere, kaltzioak haurdunaldian parte hartzen duen bezala, estrontzio isotopoak ere parte hartu dezake, plazenta zeharkatu eta fetua mindu dezake (ez dago atari-dosirik efektu estokastikoa baita)[2].

Barne erradiazioagatik kalte handiena sortzen duten isotopoa ^{131}I da. Iodo isotopoak zortzi eguneko erdibizitza du, eta giza gorputzean 7.6 eguneko erdibizitza eraginkorra du. Iodo isotopoa tiroide guruinean biltzen da, eta eragin larriak ditu giza osasunean, besteak beste, 5 Gy-ko atari-dosia gaindituta hipotiroidismoa eragin diezaioke gizabanakoari [4]. Gainera, gizabanakoak tiroideko kantzerra izan dezake [2].

Bibliografía

- [1] Michael G. Stabin. *Radiation Protection and Dosimetry: An Introduction to Health Physics*. Springer, New York, 2007.
- [2] International Advisory Committee. The international chernobyl project technical report. assessment of radiological consequences and evaluation of protective measures. *IAEA*, 1991.
- [3] The International Commission on Radiological Protection. Annals of the icrp. publication 103.the 2007 recommendations of the international commission on radiological protection. *Elsevier Ltd*, 2007.
- [4] https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-19202/Efectos%20de%20las%20RI_UCM_27%20nov%202014_A%20Real_pdf.pdf.
- [5] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation. annex d: Health effects due to radiation from the chernobyl accident. 2008.
- [6] http://csn.ciemat.es/MDCSN/recursos/ficheros_md/1581136598_1572009112950.pdf.
- [7] Irene Lichtscheidl Anna Burger. Stable and radioactive cesium: A review about distribution in the environment, uptake and translocation in plants, plant reactions and plants' potential for bioremediation. *Science of the Total Environment*, 618:1459–1485, 2018.